

基于同步相量的电力故障录波监测系统

鲁 文, 刘明祥, 孙国城

(国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘 要:介绍了 DPR-2E 型电力故障录波监测系统。DPR-2E 系统的装置硬件采用 Motorola PowerPC 和 ADI BlackFin DSP 组成双 CPU 系统,软件采用 Linux 嵌入式实时操作系统,全面提高系统的可靠性和抗干扰能力;该系统基于同步相量测量平台,利用同步时钟信号可为电力系统实时动态监测系统提供大量原始数据;高稳定度的恒温晶振和高精度守时技术全天候保证秒脉冲信号的准确性,为大范围故障分析提供同步保证;改进的 prony 算法可准确迅速判定电力系统低频振荡;高精度测距技术能够很好地适应线路参数变化带来的测距误差。DPR-2E 系统集故障录波、测距、同步相量、实时监测和连续记录为一体,为超长时间、大范围和发展性的事故分析提供了可靠的数据来源。

关键词:同步相量;故障录波监测系统;稳态记录;低频振荡

中图分类号:TM711

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2010)06-0061-05

我国将逐年实现全国联网,电力系统会越来越复杂。在紧密相连的互联电力系统中,一个局部故障能迅速向全系统传播,会导致大面积停电^[1]。目前的故障录波装置仅记录的原始波形的快速动态数据量,不能全天候保存稳态数据,只能记录故障前后几秒的原始数据,有时无法捕捉电网的低频振荡,对于电网中许多系统类型的故障不足以进行分析,对于互联系统下的大范围、长过程的故障分析更是无能为力^[2]。不同变电站的录波数据没有可比性和同步性,无法为故障后的稳定分析提供可靠的数据来源^[3]。为此,基于同步相量测量平台,利用同步时钟信号、高速 DSP 数字信号处理技术和嵌入式实时操作系统,研制出 DPR-2E 型电力故障录波监测系统,在可靠性、算法实现、通信技术上实现新的飞跃。

1 系统构成

1.1 系统硬件平台

故障录波监测系统硬件总体构成如图 1 所示。系统采用全嵌入式设计方法。前置机硬件采用 Motorola PowerPC,数据处理模块采用 ADI BlackFin DSP。两者之间采用大容量双口 RAM 实现高速数据缓冲交换,数据存储采用双 SATA 硬盘备份,极大提高了录波单元的可靠性。各智能模块之间采用总线式接口,强弱电完全分开,大大减少外部电磁干扰在弱电侧的耦合增强装置的抗干扰能力。一体化背插式结构设计,便于扩展,每故障录波监测单元最大可接入 96 路模拟量,256 路开关量。高精度、灵活接口的时钟信号,对时误差不超过 $\pm 1\mu\text{s}$ 。

1.2 系统软件平台

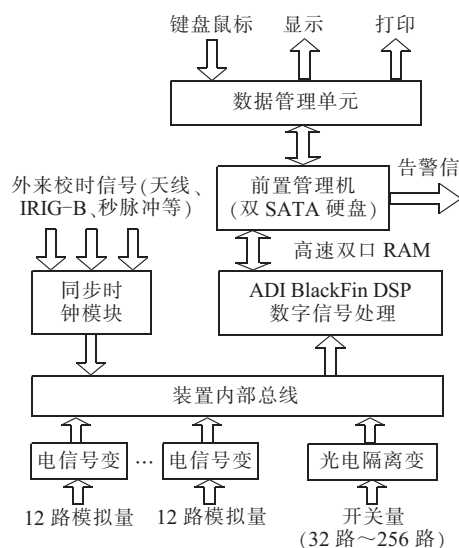


图 1 系统硬件总体构成

故障录波监测系统的软件平台满足系统可靠性和实时性的要求,同时考虑软件的维护和扩展。前置机采用源码开放的 Linux 嵌入式实时操作系统,数据管理单元软件采用跨平台设计,用于数据的冗余存储管理和人机界面操作。Linux 嵌入式实时操作系统的使用,一方面使数据管理的实时性和可靠性大大提高,另一方面可以有效防止病毒的袭击和网络攻击。数据管理单元跨平台设计满足用户多方面不同层次需求。

2 系统的关键技术

2.1 同步守时技术

目前的同步采样技术大多都基于全球卫星定位系统(GPS)或“北斗”系统(RDSS)。本文以常用的 GPS 为例,实验表明本系统在使用 RDSS 系统时同样满足所提性能指标。在收到同步信号时,模拟量经

变换、调制后进行 A/D 模数转换,模数转换器转换触发信号是 GPS 提供、并经 CPLD 处理过的同步触发脉冲,频率为 10 kHz,如图 2。该触发脉冲作为所有装置的 A/D 转换触发脉冲,实现所有装置间的严格同步采样,同时利用 GPS 给故障数据贴上精确的时间标签,提供同步相角数据。数据处理模块采用 ADI BlackFin DSP,对全部采样点逐点计算,大大提高了测量精度。经实际测试表明的测量精度可达到 0.1%;开关量分辨率为 0.1 ms;频率的测量分辨率达到 0.001 Hz,由于地理位置,GPS 天线安装遮挡,天气等因素接收的对时卫星个数不够等原因造成 GPS 短时间失步,同步采样要求在 GPS 失步情况下系统仍能很好保证秒脉冲(1 PPS)信号的准确性。这就需要系统具有守时功能。为达到此要求,系统选用一款高精度的恒温晶振,作为时间跟踪源,频率值为 20 MHz,频率精确度达到 0.000 5 PPM 的。在条件允许时,GPS 模块通过天线接收 GPS 卫星对时信号,将 GPS 模块输出的秒脉冲和恒温晶振的输出 20 MHz 脉冲信号信号送给 CPLD。当秒脉冲上升沿来临时,记下该秒脉冲的 GPS 时标信息,计数器对 20 MHz 晶振脉冲开始计数,直到下一个秒脉冲上升沿到来进行清零。当 GPS 失步后,秒脉冲通过恒温晶振控制,计数器每记到 20 000 000 个晶振脉冲,主动发一个脉冲作为系统的秒脉冲,并将 GPS 时标信息增加 1 s,同时计数器清零,秒脉冲及采样脉冲时序如图 2 所示。

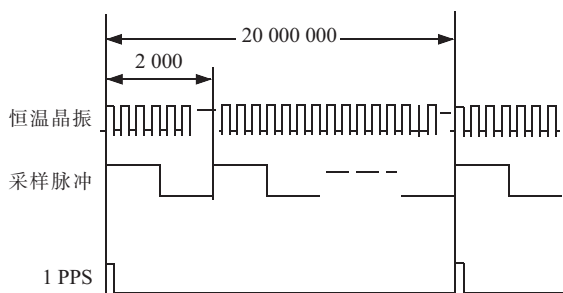


图 2 秒脉冲及采样脉冲时序

实验表明系统在 GPS 同步锁定情况下,1 PPS 信号 200 ns 精度。失去 GPS 同步时钟信号 60 min 以内相角测量误差不大于 0.2° ,在 GPS 失步 2 h 内角度误差不超过 0.3° 。

2.2 在线低频振荡辨识

传统故障录波器通过判断线路同一相电流在 0.5 s 内的变化可以部分捕捉电网的低频振荡。这对现代电网是远远不够的,如果能够估算出电网模拟量包含的频率、衰减、幅值和初相位,就可以很容易判断系统是否有明显低频振荡。1795 年,Prony 提出了用复指数函数的一种线性组合来描述等间距采样

数据的数学模型,从而形成了 Prony 算法^[7]。Prony 算法是一种能够根据采样值直接估算出信号频率、衰减、幅值和初相位的分析方法。

方法所采用的数学模型为一组 P 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数,其离散时间的函数形式见式(1):

$$f(n) \approx \sum_{i=1}^p c_i z_i^n \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中: $f(n)$ 由等时间间距 Δt 的 N 点组成, $c_i = A_i \exp(j\theta_i)$,其中 A_i 为信号幅值; θ_i 为初相; $Z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i) \cdot \Delta t]$; α_i 为衰减因子; f_i 表示振荡频率; Δt 代表采样间隔。通过一系列的数学变换,可推出:

$$\sum_{i=1}^p \alpha_i f(n-1) = 0, \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

在这里 $N \geq 2n$,如果 $N = 2n$,则方程数和未知数相等,可以直接求解,如果 $N > 2n$,则使用最小二乘法求解。多信号的 Prony 算法的推导过程与单信号的相同, m 个信号的 Prony 算法的方程式变为:

$$\sum_{i=1}^p \alpha_i f_m(n-1) = 0$$

$$m=1,2,\dots,M; n=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

$f_m(n)$ 为第 m 个信号的第 $n+1$ 个采样点。由于加入了更多的方程,此方程组变成超定方程组,求解方法同样采用最小二乘法。

定义:

$$r_m(i,k) = \sum_{n=p}^{N-1} f_m(n-k) f_m(n-i), \quad r(i,k) = \sum_{m=1}^M r_m(i,k), \quad m=1,2,\dots,M; i,k=0,1,\dots,p;$$

由此可得 Prony 算法的法方程:

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \dots & r(0,p) \\ r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r(p,0) & r(p,1) & \dots & r(p,p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

解此法方程,即可得到系数 a_1, a_2, \dots, a_p 的估计值,进一步可求解出如下特征方程的根 Z :

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0 \quad (5)$$

利用式(6)求:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N_m-1} & z_2^{N_m-1} & \dots & z_p^{N_m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{m1} \\ c_{m2} \\ \dots \\ c_{mp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_m(1) \\ f_m(2) \\ \dots \\ f_m(N_m-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解方程并利用式(7)可算出幅值、相位、频率和衰减因子。

$$A_{mi} = |c_{mi}|$$

$$\begin{aligned}\theta_{mi} &= \arctan \frac{I_m(C_{mi})}{R_e(C_{mi})} \\ a_i &= \frac{I_m(z_i)}{\Delta t} \\ f_i &= \arctan \frac{\left[\frac{I_m(z_i)}{R_e(z_i)} \right]}{2\pi\Delta t}\end{aligned}\quad (7)$$

2.3 高精度测距技术

2.3.1 单端测距

测距是故障录波监测系统的一个主要功能。在无法获得对端数据的情况下,单端测距仍是故障定位的主要手段。但其精度受非周期衰减直流分量、故障点过渡电阻和对端系统阻抗以及线路分布电容等因素影响。系统中的单端测距算法采用滤除非周期衰减直流分量,考虑过渡电阻的影响,同时采用补偿技术消除分布电容的影响^[3],较大地提高了单端测距的精确度。

2.3.2 双端测距

双端测距可以根据对端数据彻底消除过渡电阻的影响。在短路故障时,下面微分方程成立:

$$u = L_f \times R_1 \times i + L_f \times L_1 \times \frac{di}{dt} + R_g \times i_f \quad (8)$$

式中: R_1, L_1 为线路单位长度正序电阻和电感, R_g 为短路的过渡电阻, i_f 为流经过渡电阻的电流, u, i 为装置安装处的测量电压和电流。在单端测距的情况下,因为故障处的故障电流, i_f 无法测知,在单端测距计算中采用积分化简,使用故障处零序电流,假设故障处零序电流和装置安装处零序电流同相位,即

$$i_{f0} = K \times i_0 \quad (9)$$

事实上它们之间存在着一定的相位差,过度电阻较大时测距精度影响较大。双端测距把 $R_g \times i_f$ 作为一个未知量处理,利用对测数据同样列类似式(8)的方程,消去该项。从而消除过渡电阻带来的影响。

2.4 集暂态故障录波、稳态连续记录和实时监测为一体

2.4.1 暂态故障录波

故障录波监测系统可记录系统发生大扰动前后电流、电压、高频、开关状态等各输入量的变化过程,全程采用 10 kHz 采样数据记录。双 SATA 硬盘设计可以冗余备份数据,暂态故障在每个硬盘上各存储一份,以防止某一硬盘损坏,丢失全部重要数据。

2.4.2 稳态连续记录

故障录波监测系统稳态连续记录支持 1 kHz 的采样值 24 h 不间断的连续纪录,这使得监测系统需要记录的数据容量猛增,硬盘存取的次数大大增多。为解决上述问题,系统采用双 SATA 硬盘设计,

Motorola PowerPC 收集的稳态数据并不急于保存到硬盘上,而是经过约 10 s 时间的缓存,然后将 10 s 时间的稳态数据根据硬盘状态批量写入硬盘。正常运行情况下,数据交替写入硬盘,时间设置在 30 min。批量写入较之随时写入大大提高了存储效率,交替写盘不至于使硬盘始终处于高速读写状态,提高了硬盘使用寿命;其次,增加压缩机制,写入硬盘之前将数据进行有效压缩,可大大缩短写盘时间,同时也相对地增加了硬盘存取数据的能力。

2.5 故障分析与诊断

电力故障监测系统记录大量原始数据,把所有这些数据不加选择地上送调度端、故障信息管理系统或 SCADA 系统等主站系统是对调度人员是毫无意义的,还会对系统造成沉重地负担。从这些海量数据中提取有用信息在线上送上级调度端尤为必要。新型电力故障监测是多功能的智能化系统,不但能记录短路故障、暂态故障,还能进行故障定位、谐波分析和电能质量分析。

以某条线路单相接地为例,接有该条线路的故障监测终端装置会启动录波并发网络命令启动全站故障监测终端装置,但我们没有必要把所有的录波数据全部上送主站系统。故障监测终端管理机收集到所有故障数据后分析出故障线路,分析出故障类型和故障位置,形成故障简报上送,并把该线路的电压电流量重新形成故障文件上送,该次故障的其它以备调用。新型电力故障监测系统具有强大的计算能力和通信能力,以上分析与诊断功能均可以在线实现。

2.6 人机界面跨平台技术

管理机使用跨平台图形界面,具备详尽的故障分析功能如下:

- (1) 电压、电流的幅值、峰值、有效值、频率计算。
- (2) 有功、无功功率计算。
- (3) 相量、序量和谐波分析。
- (4) 波形叠加,差值等公式计算。

提供符合 ANSI/IEEE C37.111—1999(COMTRADE)标准格式的文件。支持远程维护,可远方配置,系统采用多级加密措施保证系统安全。

3 低频振荡辨识算法验证

3.1 理想单信号分析

理想单信号为:

$$\begin{aligned}f(t) &= 10 \exp(-0.0023t) \cos(2\pi \times 0.7t + 0.5\pi) + \\ &\quad 8 \exp(-0.034t) \cos(2\pi \times 0.1t + 0.3\pi) + \\ &\quad 6 \exp(-0.056t) \cos(2\pi \times 2.5t + 0.7\pi)\end{aligned}$$

首先,取时间间隔为 0.1 s,时间长度为 20 s,共

200 个数据点。利用前面 2.2 介绍的算法辨识,表 1 列出了主要模式。表中最后一项是直流分量,是拟合过程中出现的,对结果影响不大。图 3 是原始数据曲线和拟合数据曲线比较图:黑色实线为原始数据曲线,红色虚线为拟合数据曲线,两者相差很小。

表 1 理想单信号的 prony 分析结果

	幅值	振荡频率	衰减因子	相位
模式 1	9.987	0.703	-0.002 4	90.5
模式 2	8.011	0.992	-0.033 8	54.3
模式 3	5.987	2.498	-0.055 8	125.6
模式 4	0.023	0	0	-1

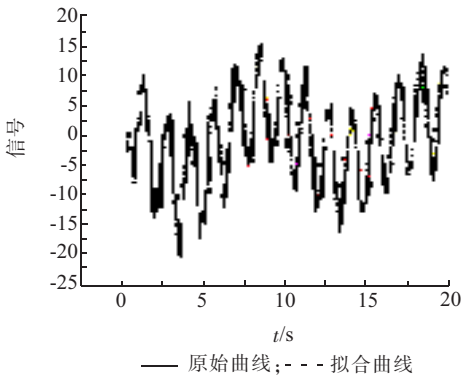


图 3 原始数据和拟合数据比较

3.2 现场低频振荡分析

2006 年 7 月 1 日 21 时,华北电网发生局部低频振荡,装设在河北万全的同步相量测量装置捕捉到这一过程。

图 4 和图 5 分别是丰万 1,2 回线功率振荡曲线,装设在河北万全的同步相量测量装置以 10kHz 采样频率在 0~20 s 区间进行采样,同时记录下丰万线的电压电流的幅值和相角,根据装置启动原因记录,这里来反向分析该过程。

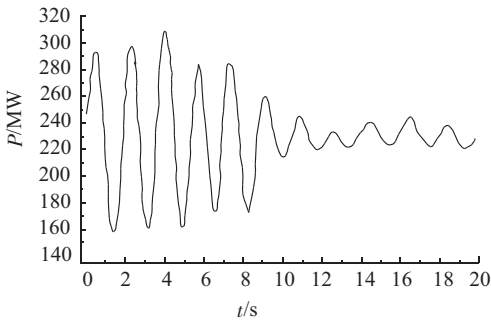


图 4 丰万 1 功率振荡曲线

根据记录的数据首先去掉高频分量,每 0.01 s 抽取一个数据点,时间长度为 20 s,阶数选为 200,下表为装置记录的主导模式,主要有 0.573 Hz, 0.578 Hz, 0.133 Hz, 0.132 Hz, 1.654 Hz, 1.535 Hz, 0.798 Hz, 0.674 Hz 8 种振荡模式,显然模式 9 和 10 为消除直流后在拟合过程中出现的。多信号的 prony 分析结果见表 2。当系统功率振荡超过稳态功

率 5%时,装置启动录波前 6 种振荡模式的振幅均超过稳态功率 5%。系统启动记录。

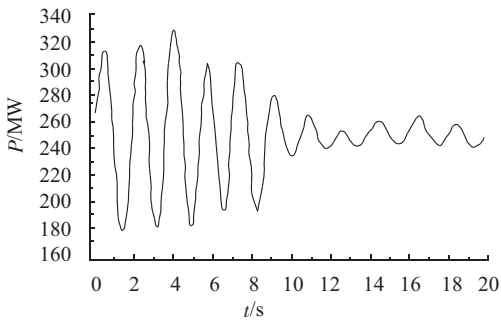


图 5 丰万 2 功率振荡曲线

表 2 多信号的 prony 分析结果

	幅值	振荡频率	衰减因子	相位
模式 1	83.45	0.573	-0.043 2	12.5
模式 2	82.56	0.578	-0.036 2	13.45
模式 3	32.58	0.133	-0.118 7	25.71
模式 4	33.56	0.132	-0.123 7	34.65
模式 5	13.12	1.654	-0.026 8	154.3
模式 6	11.27	1.535	-0.023 7	145.7
模式 7	2.14	0.798	-0.010 2	45.6
模式 8	1.98	0.674	-0.023 1	34.7
模式 9	0.045	0	0	-1
模式 10	0.097	0	0	-1

4 结束语

(1) 双核 CPU 全嵌入式设计。系统采用全嵌入式设计方法,装置采用源码开放的 Linux 嵌入式实时操作系统,硬件采用 Motorola PowerPC 和 ADI BlackFin DSP 组成双 CPU 系统,极大提高了录波单元的可靠性。

(2) 高精确性、灵活接口的时钟信号。外置共享型 GPS 单元可以接受站内多种对时信号(如脉冲方式,接受 IRIG-B 同步信号等),灵活可靠。对时精度达到同步相量测量要求。

(3) 集故障录波、测距、实时监测和连续记录为一体。暂态录波和故障测距,金属性短路的测距精度优于 2%;记录系统发生大扰动前后各输入量(电流、电压、高频、开关状态等)的变化过程,全程采用采样数据记录;稳态连续记录支持 24 h 不间断的连续纪录,以 1 kHz 的采样值记录;电力系统实时监测,可实时显示电压、电流波形及系统的有功/无功功率、相角;数据存储采用双 SATA 硬盘备份。

(4) 高可靠的集成化装置设计。一体化背插式机箱结构设计,便于扩展。强弱电完全分开,大大减少外部电磁干扰在弱电侧的耦合增强装置的抗干扰能力,提高可靠性和安全性。抗干扰能力达到

GB/T14598 规定的严酷等级为IV级标准;特别设计的PCB,满足16位分辨率的噪声要求。

(5) 支持多种通信方式。提供RS232/422/485串行通信口;提供10M/100M自适应以太网接口;支持TCP/IP协议,支持IEC 870-5-103规约;可以通过MODEM和以太网与中心站联网,支持与综自和监控系统联网。

(6) 失电保持功能。电源带有储能功能,可在失去电源下持续供电数秒,以保证全面得到暂态数据。

(7) 极高的同步性。系统借鉴同步相量采样技术,具有极高的同步性;兼容测量CT,可实现高精度相量测量;高同步性可为双端测距提供可靠数据。

(8) 改进的prony算法可准确迅速判定电力系统低频振荡。

(9) 在线故障分析与诊断降低的网络通讯负担,并提供迅速快捷简明信息。

(10) 数据管理单元跨平台设计满足用户多方面不同层次需求。

参考文献:

[1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.

[2] 王振树,张波,李欣唐. 新型电力故障录波监测系统[J]. 电力系统自动化,2007,31(10):92-101.

[3] 罗建裕,王小英,鲁庭瑞,等. 基于广域测越技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):78-80.

[4] 鲁文,徐晨亮,丁孝华,等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法[J]. 电力系统自动化,2006,30(8).

[5] 谢小荣,李红军,吴京涛,等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术,2004,28(1):10-14.

[6] 牟晓勇,黄益庄,李志康,等. 嵌入式双速暂态信号同步录波装置[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):92-94.

[7] Michel Meunier Fouierrnsform Wavelets. Prony analysis: Tools for Harmonics and Quality of Power[J]. IEEE Power Delivery,1998,13(4):11-19.

作者简介:

鲁文(1977-),男,江苏南京人,工程师,从事电力系统故障识别与诊断;

刘明祥(1974-),男,江苏南京人,工程师,从事电力系统分析与控制;

孙国城(1963-),男,江苏南京人,教授级高级工程师,从事电力系统分析和控制。

Power Fault Recording and Monitoring System Based on Synchrophasor

LU Wen,LIU Ming-xiang, SUN Guo-cheng

(State Grid Electric Power Research Institute,Nanjing 210003,China)

Abstract: At present, power system interconnection has brought new challenges to the safety and stability of power system operation. In the event that a large-scale and long-duration fault occurs in the interconnected system, the power fault recording and monitoring system (PFRMS) should be able to meet the requirements of fault analysis. The Paper elaborates a power fault recording and monitoring system with the type of DPR-2E. In order to improve system reliability and anti-jamming, the hardware device of DPR-2E adopts a twin CPU system made up of Motorola PowerPC and ADI BlackFin DSP and the software adopts Linux embedded real-time operating system. Based on the platform of synchrophasor measurement and the synchronous clock signal, DPR-2E can supply large-scale original data. Constant-temperature crystal oscillator with good stability and time keeping technique with high precision ensures the veracity of one Pulses Per Second (1PPS) at any time and the synchronous analysis of large-scale fault. The improved prony algorithm identifies the power system low frequency oscillation quickly and exactly. The high accuracy location technology can commendably adapt to the ranging fault due to the variation of line parameters. The system realizes consecutive recording over a long period of time and uniform analysis of the steady, synchrophasor, dynamic and transient data, providing reliable data sources for analysis of the ultra-long, large-scale and developing fault.

Key words: synchrophasor; fault recording and monitoring system; stability recording; low frequency oscillation

(上接第60页)

Application of Test Technology in 500 kV Yushan Smart Substation

LI Xiu-jin, HUANG Wei, YUAN Yu-bo, DENG Jie-qing, QIANG Sheng, GAO Lei, ZHANG Xiao-yi, CUI Xiao-xiang

(Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211102,China)

Abstract: As the development of new technologies such as pure optical transformer, IEEE1588 clock synchronization technology, IEC61850-9-2 network construction etc. in recent years, these new technologies have been preliminarily explored to be applied in some digital substations. It is a prominent problem to systematically evaluate the performance of digital substation. This paper introduces the project's scheme and practical experience of digital interval test in east Suzhou (Yushan substation), proposes the content and measure of the digital substation test, and concludes some problems in the test.

Key words: digital substation; IEC61850; digital test; smart grid